

孙鹏飞, 么 娆, 邹宸玮, 等. 基于改进 RRT* 算法的机械臂路径规划[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(4): 171-176. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 250424

基于改进 RRT* 算法的机械臂路径规划

孙鹏飞, 么 娆, 邹宸玮, 王大中

(上海工程技术大学 航空运输学院(飞行学院), 上海 201620)

摘要: 针对传统的快速探索随机树算法(RRT)搜索时间长、采样效率低、规划路径曲折,以及快速探索随机树星算法(RRT*)没有方向、收敛速度慢、搜索效率低等问题,同时针对在无障碍环境下,2种算法不能及时搜索路径的问题,提出了一种改进的RRT*算法。首先,在算法开始搜索时通过连接起点与目标点,判断能否直接到达,以减少无用搜索,如果不能直接到达,则维持原有搜索算法扩展节点。然后,引入目标偏置策略来引导节点的的生长方向,以减少随机树节点的盲目扩展。此后针对随机树生成最终路径曲折、节点过多的问题,对路径进行简化,减少路径节点,并针对简化后的路径再次进行优化,最终得到一条从起点到目标点的无碰撞路径。在Matlab平台上对改进后的算法进行了实验验证,并与其他算法进行了比较,验证了改进后算法的有效性和优越性。

关键词: 改进 RRT* 算法; 路径规划; 机械臂; 目标偏置

中图分类号: TP241; TP18

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)04-0171-06

Path planning of manipulator based on improved RRT* algorithm

SUN Pengfei, YAO Rao, ZOU Chenwei, WANG Dazhong

(School of Air Transportation and School of Flying, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The traditional Rapidly-exploring Random Tree algorithm (RRT) has long search time, low sampling efficiency and tortuous planning path, and the Rapidly-exploring Random Tree star algorithm (RRT*) has the problems of no direction, slow convergence speed and low search efficiency. For this situation, an improved RRT* algorithm is proposed to solve the problem that the two algorithms can not search the path in time in barrier-free environment. Firstly, when the algorithm begins to search, the starting point and the target point are connected to determine whether it can be reached directly, so as to reduce useless search. If it cannot be reached directly, the original search algorithm is maintained to expand nodes. Secondly, the target bias strategy is introduced to guide the growth direction of the nodes in order to reduce the blind expansion of random tree nodes. After that, in view of the problems of tortuousness in generating the final path and too many nodes in the random tree, the path is simplified to reduce the path nodes, and then the simplified path is optimized again to obtain a collision-free path from the starting point to the target point. The improved algorithm is verified by experiments on Matlab platform, and compared with other algorithms, the effectiveness and superiority of the improved algorithm are verified.

Key words: improved RRT* algorithm; path planning; robotic manipulator; target bias

0 引言

近年来,制造业趋于自动化和无人化。与此同时,随着机械臂工作任务越来越复杂,其中涉及的路径规划也日渐引起学术界的普遍关注,而规划的核心

就在于机械臂的避障问题。机械臂的最优路径规划问题可以表述为机械臂末端执行器以最低的代价找到一条从起点到目标点的无碰撞路径。

在现有的机械臂研究中,机械臂运动的稳定性是一个关键课题,因此开发一种寻找高效、无碰撞路

基金项目: 上海市地方高校能力建设项目(20030501100)。

作者简介: 孙鹏飞(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:机械臂,路径规划;邹宸玮(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向:图像处理,图像识别;王大中(1966—),男,博士,教授,主要研究方向:精密磨抛机器人技术,复合材料智能制造与健康监测,刀具优化设计与开发等。

通信作者: 么 娆(1976—),女,博士,教授,主要研究方向:3D数字化无损检测及其自动化控制研究。Email: yaorao@sues.edu.cn。

收稿日期: 2023-10-08

径的方法对机械臂的运动则尤为重要^[1]。常用的路径规划算法有 A* 算法^[2]、人工势场法 (APF)^[3]、概率路线图法 (PRM)^[4] 和快速搜索随机树 (RRT) 算法^[5] 等。在这些不同的运动规划算法中, A* 算法是一种基于图搜索的传统路径规划算法, 但计算量庞大, 不适合用于高维空间。APF 算法规划的路径容易陷入局部最优, 这就使得很难到达最终目标点。PRM 算法是一种基于图搜索的算法, 搜索速度快, 但需要对状态空间进行预处理。而 RRT 算法只需要对状态空间采样点进行随机采样, 不需要对状态空间进行预处理。因此 RRT 算法被广泛应用于机械臂的路径规划中。但 RRT 算法也有一些不足, 存在规划路径质量不高、不够平滑、规划效率较低等问题。面对这种情况, 也随即推出许多算法用来解决机械臂的最优路径规划问题。

针对搜索速度的问题, Kuffner 等学者提出了 Bi-RRT 算法^[6]。2 个随机树从初始点和目标点开始生长搜索, 加快了算法的探索速度和收敛性。随后, 又提出了 RRT-connect 算法, 提高了节点扩展的效率^[7]。Karaman 等学者^[8] 提出了 RRT* 算法。该算法通过重新选择父节点和重新布线, 减少了冗余节点, 提高了算法的效率。Jordan 等学者^[9] 又提出 Bi-RRT* (Bi-directional RRT*)、即双向扩展的 RRT* 算法, 通过改进启发式函数以获得最优路径。文献^[10] 则将 APF 算法的人工吸引场 (AAF) 与 RRT 算法相结合, 提出了一种改进的 AAF-RRT 算法。

但是, 这些算法都是对 RRT 算法节点扩展的改进, 没有对路径进行处理。针对上述 RRT 算法的随机性带来的路径不光滑问题, 文献^[11] 结合基本 RRT 算法和 BG-RRT 算法的优点, 提出了一种 1-0 BG-RRT 算法。该算法使用 B 样条法和贪婪策略来优化求解路径。文献^[12] 提出了一种基于 B 样条曲线平滑的改进型 RRT 算法, 通过使用 B 样条曲线来简化路径和平滑过程, 生成足够平滑的路径。文献^[13] 提出了一种基于 RRT* 和 B 样条曲线的组合方法, 用于平滑基于 RRT* 算法生成的路径。文献^[14] 提出了平滑 RRT (S-RRT) 算法。该算法提出了一种基于最大曲率约束的路径优化策略, 以生成机器人手臂的平滑弯曲连续可执行路径。该方法可以显著提高 RRT 算法的采样速度。

以上均是对 RRT 算法优化问题的一些研究, 但是仍未考虑无障碍环境下路径搜索问题。针对无障碍环境路径搜索以及传统 RRT 算法搜索效率低, 路径质量差的问题提出一种改进 RRT 算法。该方法

首先采用直连方法判断起点和目标点是否可以直接到达, 以减少在无障碍环境下无用的搜索, 然后引入目标偏置策略, 从而引导随机树节点的生长方向, 减少搜索的盲目性, 最后进行路径简化删除路径冗余节点。

1 机械手的运动学分析

本研究以 PUMA560 系列机械臂为研究对象, 其结构如图 1 所示。文中采用标准 DH 参数法来建立坐标系, 并在表 1 中给出了具体的 DH 参数。

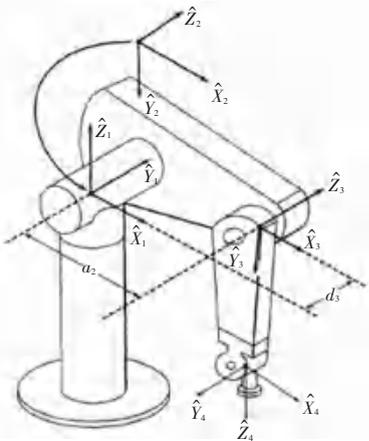


图 1 PUMA-560 工业机械手示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the PUMA - 560 industrial manipulator

表 1 机械手 DH 参数表

Table 1 DH parameters of the manipulator

i	α_{i-1}/rad	a_{i-1}/mm	d_i/mm	θ_i/rad
1	$\pi/2$	0	0	θ_1
2	0	100	0	θ_2
3	$\pi/2$	10	20	θ_3
4	$\pi/2$	0	100	θ_4
5	$\pi/2$	0	0	θ_5
6	0	0	0	θ_6

2 改进的 RRT 算法

2.1 传统 RRT 算法

RRT 算法是一种基于采样的路径规划算法, 通过随机采样对工作空间进行全局搜索, 具有良好的空间搜索能力, 在高维空间的路径规划中表现出色。高维空间中的路径搜索往往比低维空间中的路径搜索更为复杂。而经典的 RRT 算法是一种高效的多维空间规划方法, 其基本思想是以树的形式从起点开始探索空间, 并在空间中随机采样, 利用随机采样取点的方式生成新的子节点, 使扩展树不断生长, 扩

展树的分支和叶子,直到探索树搜索到目标点。具体的扩展过程如图 2 所示。

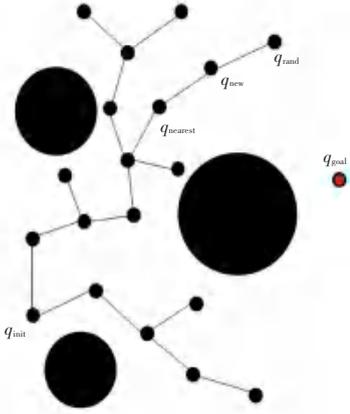


图 2 RRT 算法随机树扩展流程图

Fig. 2 Random tree extension of RRT algorithm

RRT 算法的步骤如下:

- (1) 选择起点 (q_{init}) 作为根节点, 确定目标节点 (q_{goal})。
- (2) 在状态空间中生成一棵随机树 (T), 从随机树中选择与随机采样点 (q_{rand}) 的欧氏距离最近的节点 ($q_{nearest}$) 作为父节点。
- (3) 以步长 (ρ) 向随机采样点方向生成一个新的节点 (q_{new})。
- (4) 判断新节点和最近节点之间的连线是否与障碍物碰撞。如果发生碰撞, 则删除新节点并生成一个新的随机点。反之将新节点添加到随机树中, 并将其父节点指定为最近的节点 ($q_{nearest}$)。
- (5) 计算新节点与目标节点的距离。如果距离小于或等于设定的阈值, 则连接新节点和目标节点, 完成搜索。反之, 则重复上述步骤, 直到达到搜索次数上限或者找到目标节点。

具体生成新节点展开方式如下所示:

$$q_{new} = q_{nearest} + step \times (q_{rand} - q_{nearest}) / \|q_{rand} - q_{nearest}\| \quad (1)$$

2.2 RRT* 算法

RRT* 算法是 RRT 算法的改进算法之一, 可以快速找到初始路径, 并随着迭代次数的增加, 得到的路径也渐趋优化。也就是说, RRT* 算法是渐进优化的, 该算法与 RRT 算法的主要区别在于为 q_{new} 重新选择父节点的过程和重新布线的过程。RRT* 算法是在 RRT 算法选择 q_{new} 的基础上, 以 q_{new} 为圆心, 在设定的半径下的圆周邻域中搜索邻近节点作为潜在的父节点, 然后计算路径成本, 选择路径成本最小且无碰撞的节点作为 q_{new} 的父节点, 替换原来的父

节点 $q_{nearest}$, 最后计算 q_{new} 作为新的父节点时的成本, 继续选择该区域的节点加入路径, 如果新的路径成本小于原路径成本且没有发生碰撞, 则指定该节点的父节点为新节点, 并将相应的成本更新为新成本。RRT* 算法过程如图 3 所示。

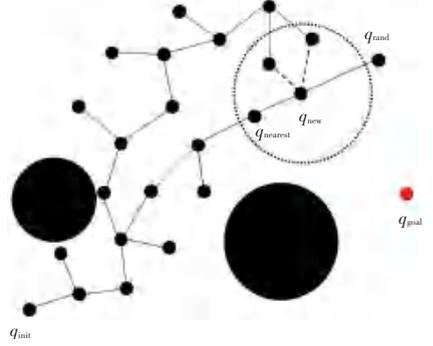


图 3 RRT* 算法随机树扩展流程图

Fig. 3 Random tree extension of RRT* algorithm

2.3 改进的 RRT 算法

虽然 RRT 算法有很多优点, 但由于其搜索策略为随机抽样, 具有随机性, 缺乏引导性, 搜索速度慢, 效率低, 生成的路径是曲折、不平滑的。针对这些问题, 本文提出了一些优化方法。

2.3.1 从起点到目标点的直连判断

为了提高算法在无障碍环境下亦或是起点与目标点连线方向上无障碍环境下的搜索效率, 避免不必要的搜索, 本文在路径搜索的早期阶段将起点直接连接到目标点, 并进行碰撞检测。如果没有发生碰撞, 则完成路径搜索, 反之维持原有搜索。

其基本设计思路是在特殊环境下, 若规划路径可以直接到达, 就没有必要再使用 RRT 算法搜索路径, 这就大大加快了算法的搜索速度。

2.3.2 基于概率的目标偏置策略

本文通过基于概率的目标偏置策略来优化 RRT 算法的节点扩展。传统的 RRT 算法采用随机采样, 存在搜索时间长和采样点随机性高的问题。为了解决这些问题, 并保持算法的随机性, 本文引入了目标偏差概率阈值 P_{target} , 并随机生成一个概率值 $P \in [0, 1]$ 。根据下式:

$$q_{rand} = \begin{cases} q_{goal}, & \text{if } P \geq p_{target} \\ q_{rand}, & \text{if } P < p_{target} \end{cases} \quad (2)$$

如果 P 小于 P_{target} , 则节点扩展仍然随机采样; 反之节点扩展则朝向目标点。这样改进后的节点扩展方向更加明确, 加快了随机树扩展到目标点的过程, 提高了搜索效率。同时, 通过保留 RRT 算法的随机性, 当发生碰撞时可以避免陷入局部最优情况,

并通过随机扩展逃离碰撞区域。

本文选取 $P_{\text{target}} = 0.6$, 该改进策略在平衡节点扩展到目标点和随机扩展之间起到了重要作用。

2.3.3 去除路径冗余点

RRT 算法生成的初始路径存在折点多、拐点多、曲率不连续等问题,需要对路径进行简化处理。简化后的路径去除了冗余节点,减少了路径尖点和冗余点的数量,路径长度更短。

简化方法如下:对每个路径节点按顺序编号,并记录编号信息,从目标点开始依次连接每个节点,对连线进行障碍物碰撞检测,记录没有与障碍物碰撞的节点,并将节点编号最大的点作为下一个要连接的路径点。上一步生成的新节点为新起点,重复上述操作,直到遍历所有路径节点到起始点,完成路径简化。

简化后的路径可以更好地应用于机械臂。路径简化如图4所示。在图4中,初始路径为黑色,简化后的路径为红色,可以看出已去除了路径上的冗余节点,减少了不必要的折点,路径长度更短。

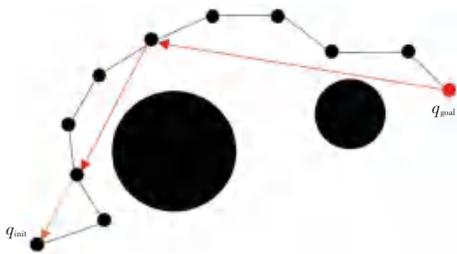


图4 路径简化

Fig. 4 Path simplification

综上所述,该方法首先采用直连方法判断起点和目标点是否可以直达,以减少在无障碍环境下无用的搜索,然后引入目标偏置策略,从而引导随机树节点的生长方向,减少搜索的盲目性,此后再进行路径简化删除路径冗余节点。

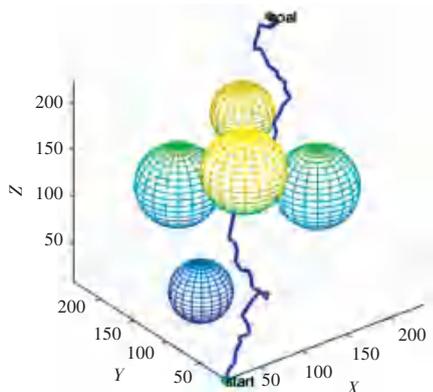
3 实验结果与讨论

为了验证改进后的 RRT 算法的有效性和可行性,在 Matlab 平台对改进前后的 RRT 算法以及相关的 RRT 算法进行仿真实验。仿真实验平台为 DELL Inspiron 5577, Matlab 版本为 R2018b。

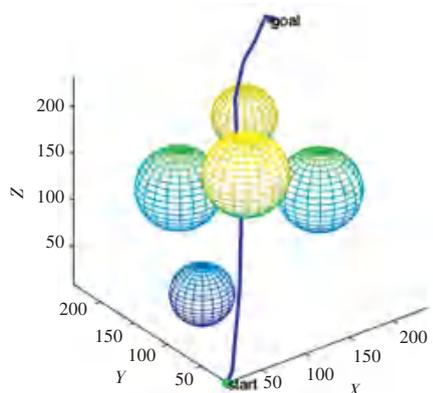
3.1 Matlab 仿真实验

首先在三维空间中进行了模拟实验,建立了2种地图类型。一种是简单环境,起点和终点之间的连接线上没有障碍物或空间中没有障碍物,如图5所示;另一种是复杂环境,如图6所示。将改进后的

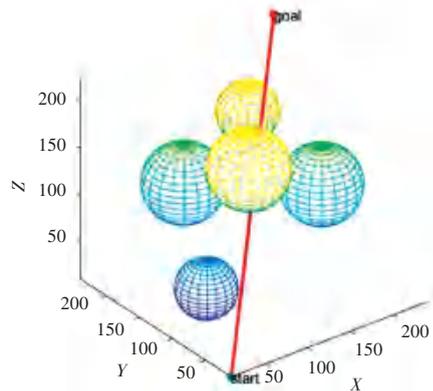
算法与 RRT 算法、RRT* 算法进行比较,对每组实验对应的平均路径长度、平均搜索时间、平均路径采样点数量和平均路径节点数量进行比较,得到的数据见表2、表3。空间设置为 $250 \times 250 \times 250$,障碍物区域为随机设置的球形区域,起点为绿色实点,目标点为红色实点,路径由粗实线表示,起点的坐标设置为 $(10, 10, 10)$,目标点的坐标为 $(225, 225, 225)$,扩展步长为10,阈值设置为10,最大迭代次数为10 000。每组实验进行50次,求取平均值进行比较,以减少随机性对实验结果的影响。



(a) RRT 算法



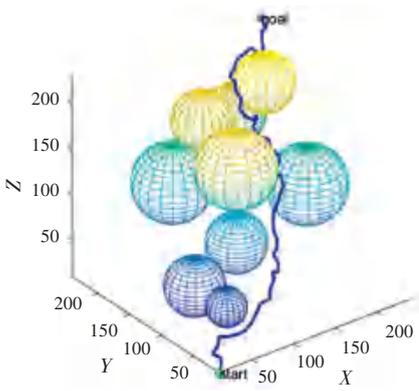
(b) RRT* 算法



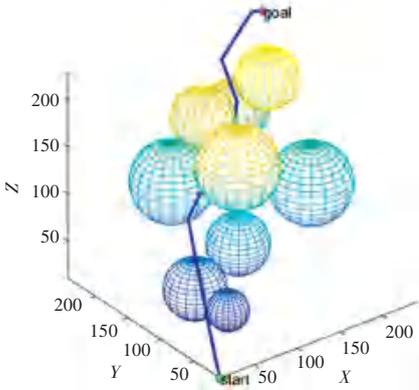
(c) 改进 RRT* 算法

图5 地图1下3种算法路径搜索图

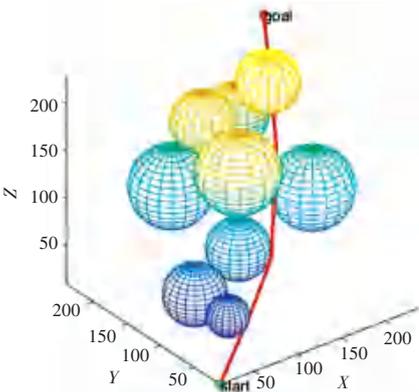
Fig. 5 Path search diagram of three algorithms in map 1



(a) RRT 算法



(b) RRT* 算法



(c) 改进 RRT* 算法

图 6 地图 2 下 3 种算法路径搜索图

Fig. 6 Path search diagram of three algorithms in map 2

表 2 结果显示,在这种地图情况下,与其他算法相比,改进后的算法耗时最少,路径规划速度最快,而规划的路径长度最短,平均采样点和路径节点数最少。在无障碍环境下亦或是起点与目标点连线方向上无障碍环境下避免了不必要的搜索。

分析表 3 结果可以得出,与其他算法相比,改进后的算法在路径规划方面花费的时间最少,速度最快,而规划的路径长度最短,平均采样点和路径节点数最少。改进后的算法路径平均搜索时间分别减少

了 69.86% 和 91.62%, 平均路径长度分别减少了 29.47% 和 6.26%, 平均采样点数分别减少了 93.20% 和 94.69%, 平均路径点数分别减少了 87.31% 和 30.97%。

表 2 机械手 DH 参数表

Table 2 DH parameters of the manipulator

算法	搜索时间/s	路径长度	采样点个数	路径节点数
RRT	2.887 873 000	544.155 6	1 709.52	55.00
RRT*	9.117 534 000	393.824 7	2 404.34	8.48
改进 RRT	0.003 477 896	372.390 9	0	2.00

表 3 机械手 DH 参数表

Table 3 DH parameters of the manipulator

算法	搜索时间/s	路径长度	采样点个数	路径节点数
RRT	2.783 690 0	543.025 8	1 757.28	57.82
RRT*	10.011 530 0	408.583 9	2 252.78	10.48
改进 RRT	0.839 103 3	383.023 8	119.63	7.34

结果表明,改进后的算法减少了路径节点的数量,同时得到了较短的路径。与其他算法相比,改进后的算法搜索时间更短,而且路径更平滑,证明了改进后算法的优越性。

3.2 机械手的路径规划仿真

然后,为了说明本文改进算法的有效性,在 Matlab 软件平台上对机械手进行了建模。在三维空间中,障碍物设置在坐标(150, 50, 90)、(200, -30, 65)、(100, 170, 90),障碍物用半径为 50 的球表示。起始点的坐标设定为(100, 100, 80),目标点的坐标为(150, -80, 100)。改进算法的最终路径规划情况见图 7。

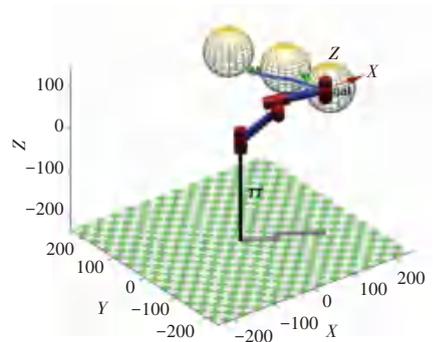


图 7 改进算法下机械手路径仿真

Fig. 7 Robotic path simulation with improved algorithm

结果表明,机械臂在改进算法下能有效避开空间中的障碍物,获得无碰撞路径,是一种有效的路径规划算法。

4 结束语

本文针对 RRT 算法规划路径的问题,提出了一种改进算法,采用直连方法判断起点和目标点能否直接到达,避免了起点和目标点之间没有障碍物时产生的额外搜索,然后利用目标偏置策略提高路径搜索速度,最后通过去除路径中的冗余点来简化得到的路径。结果表明,改进后的算法提高了算法的收敛速度,有效地消除了路径冗余节点,而且搜索得到的路径更短、更平滑。因此,本文提出的改进算法是有效和可行的。

参考文献

- [1] WANG Min, HOU Zhixiang. Continuous trajectory point control research of six degree of freedom mechanical intelligent arm position[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2018, 19:221-226.
- [2] 陆辉山,张燕飞,王福杰,等. 融合插点和跳跃点改进 A* 算法的路径规划[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(24):10387-10393.
- [3] 夏长高,丁伟兵,韩江义. 融合 B 样条与改进 APF 的路径规划算法研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2022, 36(6): 48-54.
- [4] 林俊志,席万强,周俊,等. 基于改进 PRM 和 APF 的移动机器人路径规划[J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(12):1-6.
- [5] 许瑶,刘晓峰. 基于改进 RRT 算法的无人车路径规划研究与测试[J]. *国外电子测量技术*, 2023, 42(8):132-138.
- [6] 欧阳子路,王鸿东,王检耀,等. 基于改进 Bi-RRT 的无人水面艇自动避碰算法[J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(6):8-14.
- [7] 韩康,程卫东. 基于改进 RRT-Connect 算法的机械臂路径规划[J]. *计算机应用与软件*, 2022, 39(3):260-265.
- [8] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2011, 30(7):846-894.
- [9] JORDAN M, PEREZ A. Optimal bidirectional rapidly-exploring random trees[R]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2013.
- [10] HONG Le, SONG Changhui, YANG Ping, et al. Two-layer path planner for AUVs based on the improved AAF-RRT algorithm[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2022, 21(1):102-115.
- [11] GAN Yi, ZHANG Bin, KE Chao, et al. Research on robot motion planning based on RRT algorithm with nonholonomic constraints[J]. *Neural Processing Letters*, 2021, 53: 3011-3029.
- [12] HUANG G, MA Q. Research on path planning algorithm of autonomous vehicles based on improved RRT algorithm[J]. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 2022, 20:170-180.
- [13] ESHTEHARDIAN S, KHODAYGAN S. A continuous RRT*-based path planning method for non-holonomic mobile robots using b-spline curves[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2023, 14:8693-8702.
- [14] WEI Kun, REN Bingyin. A method on dynamic path planning for robotic manipulator autonomous obstacle avoidance based on an improved RRT algorithm[J]. *Sensors*, 2018, 18(2):571.